



FR00/03

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

REC'D 14 APR 2000

WIPO PCT

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 31 MARS 2000

**DOCUMENT DE
PRIORITÉ**

PRÉSENTÉ OU TRANSMIS
CONFORMÉMENT À LA REGLE
17.1.a) OU b)

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE

26 bis, rue de Saint Petersburg
75800 PARIS Cédex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04
Télécopie : 01 42 93 59 30



26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 93 59 30

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

Confirmation d'un dépôt par télécopie ☐

Cet imprimé est à remplir à l'encre noire en lettres capitales

Réservé à l'INPI

DATE DE REMISE DES PIÈCES **15 JAN 1999**
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL **99 00366**
DÉPARTEMENT DE DÉPÔT **75** **15 JAN. 1999**
DATE DE DÉPÔT

1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE
À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE

IMAGINE OPTIC
M. BUCCOURT
2, rue Jean Rostand
91893 ORSAY CEDEX

2 DEMANDE Nature du titre de propriété industrielle

☒ brevet d'invention

☐ demande divisionnaire



demande initiale

☐ certificat d'utilité

☐ transformation d'une demande
de brevet européen

☐ brevet d'invention

☐ certificat d'utilité n°

date

Établissement du rapport de recherche

☐ différé

☒ immédiat

Le demandeur, personne physique, requiert le paiement échelonné de la redevance

☐ oui

☒ non

Titre de l'invention (200 caractères maximum)

PROCÉDÉ ET DISPOSITIF D'ANALYSE DE FRONT D'ONDE
À GRANDE DYNAMIQUE

3 DEMANDEUR (S) n° SIREN **4.1.0.0.7.2.5.3.2**

code APE-NAF **33.2.B**

Nom et prénoms (souligner le nom patronymique) ou dénomination

IMAGINE OPTIC

Forme juridique

SARL

Nationalité (s) **Française**

Adresse (s) complète (s)

2 rue Jean Rostand
91893 ORSAY CEDEX

Pays

France

En cas d'insuffisance de place, poursuivre sur papier libre ☐

4 INVENTEUR (S) Les inventeurs sont les demandeurs

☐ oui

☒ non

Si la réponse est non, fournir une désignation séparée

5 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES

☐ requise pour la 1ère fois

☐ requise antérieurement au dépôt : joindre copie de la décision d'admission

6 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE

pays d'origine

numéro

date de dépôt

nature de la demande

7 DIVISIONS

antérieures à la présente demande

n°

date

n°

date

8 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE

(nom et qualité du signataire)

Samuel BUCCOURT, gérant
d'Imagine Optic

SIGNATURE DU PRÉPOSÉ À LA RÉCEPTION

SIGNATURE APRÈS ENREGISTREMENT DE LA DEMANDE À L'INPI

DÉSIGNATION DE L'INVENTEUR

(si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

DEPARTEMENT DES BREVETS

26bis, rue de Saint-Petersbourg
75800 Paris Cédex 08

Tél. : 01 53 04 53 04 - Télécopie : 01 42 93 59 30

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL

99 00366

TITRE DE L'INVENTION :

PROCÉDÉ ET DISPOSITIF D'ANALYSE DE FRONT
D'ONDE À GRANDE DYNAMIQUE

LE(S) SOUSSIGNÉ(S)

IMAGINE OPTIC, 2 rue Jean Rostand à ORSAY (91400)
représentée par son gérant Samuel BUCOURT

DÉSIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) (indiquer nom, prénoms, adresse et souligner le nom patronymique) :

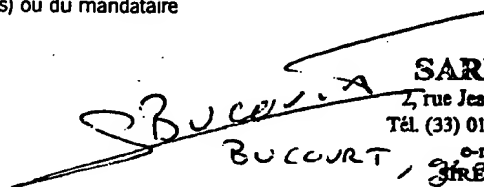
LEVEUR Xavier, Jean-François
16 allée de la Gambanderie
91190 Gif-sur-Yvette.

BUCOURT Samuel Henri
2 avenue Voltaire
91440 Bures-sur-Yvette

NOTA : A titre exceptionnel, le nom de l'inventeur peut être suivi de celui de la société à laquelle il appartient (société d'appartenance) lorsque celle-ci est différente de la société déposante ou titulaire.

Date et signature (s) du (des) demandeur (s) ou du mandataire

28 janvier 99


SARL IMAGINE OPTIC
2 rue Jean Rostand - 91893 ORSAY CEDEX
Tél (33) 01 69 85 24 04 - Fax (33) 01 69 35 07 07
e-mail: sambuck@imropet.fr
SIRET 419 072 532 0014 - APE 3328
BUCOURT, gérant IMAGINE OPTIC

Procédé et dispositif d'analyse d'un front d'onde à grande dynamique

La présente invention concerne un procédé et un dispositif
5 d'analyse d'un front d'onde optique. Elle constitue une amélioration des procédés d'analyse de front d'onde basés sur la mesure locale de la pente du front d'onde.

L'analyse d'un front d'onde par mesure locale de la pente
(correspondant à la dérivée locale de la phase du front d'onde)
10 est par exemple le principe des analyseurs de front d'onde dits 'Shack-Hartmann matriciels'. Ils comportent généralement une matrice de microlentilles sphériques et un détecteur matriciel, chaque microlentille focalisant la surface élémentaire du front d'onde interceptée par la sous-pupille correspondant à la micro-
15 lentille, formant ainsi une tache lumineuse sur le détecteur. La pente locale de la surface élémentaire est déterminée à partir de la position de la tache sur le détecteur. L'analyse de la surface du front d'onde proprement dite, c'est-à-dire la reconstruction de la phase du front d'onde par exemple sur une base de
20 polynômes, peut être obtenue par intégration des mesures locales de la pente. D'autres types d'analyseurs travaillent sur une ligne du front d'onde. Dans ce cas on utilise par exemple des microlentilles cylindriques disposées linéairement et un détecteur à géométrie linéaire. De la même façon que dans le Shack-
25 Hartmann matriciel, les pentes locales de la ligne d'onde sont mesurées à partir des positions des taches formées par les microlentilles.

De façon générale, le procédé selon l'invention s'applique à tout type d'analyseurs de front d'onde basés sur la mesure de
30 la pente locale du front d'onde. Dans la suite, on nommera 'matrice de microlentilles' tout ensemble de microlentilles pouvant être utilisées dans ce type d'analyseur, les microlentilles pouvant être agencées linéairement ou selon une matrice à deux dimensions. De la même façon, on parlera de l'analyse d'un
35 « front d'onde », cette analyse pouvant concerner indifféremment une partie de la surface du front d'onde, en particulier une ligne du front d'onde ou la surface totale du front d'onde.

La figure 1 montre un ensemble ML de microlentilles L_i et un détecteur DET pour la mise en œuvre d'un procédé d'analyse de

front d'onde tel que décrit précédemment. Lorsqu'un front d'onde F_1 pénètre dans le système, chaque microlentille forme une tache T_i sur le détecteur. Pour déterminer la position des taches, on fait généralement l'hypothèse qu'une tache T_i formée par une microlentille L_i donnée, se trouve dans une zone de localisation présumée Z_i . Cette zone de localisation est par exemple définie par la projection sur le détecteur DET de la sous-pupille SP_i correspondant à la microlentille L_i , comme cela est illustrée sur la figure 1. Cette hypothèse présente l'intérêt de simplifier considérablement le circuit de localisation des taches et donc de rendre le système plus rapide. Parfois, la structure de la matrice de microlentille n'est pas parfaite et peut présenter des défauts locaux, par exemple des défauts d'agencement des microlentilles ou de taille d'une microlentille par rapport à une autre. Cela introduit une erreur sur la position de la tache formée. Pour pallier ce type de problème, on soustrait généralement aux positions des taches formées à partir du front d'onde à analyser, les positions des taches formées à partir d'un faisceau de référence parfaitement connu. Bien sûr, pour ne pas introduire d'erreur lors de cette opération, il est nécessaire que soit soustraite l'une avec l'autre les positions de deux taches formées par la même microlentille. Si l'on suppose a priori qu'une tache détectée dans une zone de localisation donnée est issue de la sous-pupille qui définit cette zone, on risque d'introduire une erreur lors de l'opération de soustraction lorsqu'un front d'onde présente par exemple un basculement important. En effet, comme cela apparaît par exemple sur la figure 1, si un front d'onde F_2 présente un basculement important, la tache T_i formée par la lentille L_i se trouve dans la zone de localisation présumée Z_{i+1} correspondant à la lentille L_{i+1} . Il existe un décalage d'une sous-pupille (dans l'exemple choisi) entre la sous-pupille SP_i dont est issue la tache T_i et la sous-pupille SP_{i+1} qui définit la zone de localisation Z_{i+1} dans laquelle se trouve effectivement la tache T_i .

Bien sûr, on cherche toujours à obtenir des matrices de microlentilles parfaites et les progrès de la technologie vont dans ce sens. Mais le problème consistant à connaître de façon certaine la correspondance entre une tache détectée et la sous-pupille dont elle est issue se pose toujours, par exemple lors-

qu'on cherche une mesure exacte du basculement à l'aide d'un dispositif dont on souhaite qu'il ait une grande dynamique, c'est-à-dire un dispositif capable d'analyser des fronts d'onde présentant entre autre de forts basculements. Dans ce cas, il est nécessaire pour connaître de façon certaine cette correspondance de pouvoir mesurer le décalage entre la sous-pupille dont est issue la tache et la sous-pupille qui définit la zone de localisation présumée dans laquelle se trouve la tache.

Une solution est proposée dans ce sens par la société Adaptive Optics Associates (AOA, Cambridge, MA). Cette solution, appliquée à un analyseur de front d'onde de type Shack-Hartmann matriciel, est expliquée dans l'article 'Hartmann sensors detect optical fabrication errors' (LASER FOCUS WORLD, Avril 1996). Elle consiste, au cours de la mesure, à rapprocher le détecteur de la matrice de microlentilles de telle sorte que, quelle que soit la pente locale du front d'onde que l'on analyse, tout le flux collecté par une sous-pupille se trouve intégralement sur la zone de localisation présumée définie par cette sous-pupille. Puis, on éloigne le détecteur de la matrice de microlentilles jusqu'à sa position normale de travail en suivant la position de la tache. On peut ainsi repérer si elle change de zone. Cette solution présente des inconvénients. En particulier, elle nécessite le déplacement du détecteur, ce qui entraîne des contraintes mécaniques dans le système et le risque que soit introduite une erreur sur la mesure, du fait d'un éventuel basculement du détecteur, ou d'un mauvais repositionnement axial lors du déplacement. D'autre part, cette opération de calibration doit être répétée pour chaque analyse d'un nouveau front d'onde. Et même au cours de l'analyse d'un front d'onde, comme la correspondance entre une tache et la microlentille dont elle est issue est déterminée en suivant la position de cette tache, si cette position est perdue (par exemple parce que le flux est momentanément coupé), la correspondance n'est plus certaine et la calibration est à refaire.

Pour pallier ces inconvénients, la présente invention propose une autre solution permettant une mesure exacte des paramètres du front d'onde et notamment de son basculement. Elle consiste à choisir une matrice de microlentilles présentant une ou plusieurs variations locales de sa structure. Selon un exem-

ple de mise en œuvre, chaque variation locale peut être un écart de positionnement d'une ou de quelques microlentilles. Cette variation peut être un défaut non voulu de la matrice ou une variation locale introduite de façon contrôlée lors de la fabrication. En comparant les positions des taches formées à partir d'un front d'onde à analyser avec les positions des taches formées par exemple à partir d'un front d'onde de référence connu, on peut, grâce à la présence de la variation locale de la structure qui par exemple introduit des variations dans les positions de certaines taches, mesurer le décalage éventuel entre la sous-pupille dont est issue une tache détectée et la sous-pupille qui définit la zone de localisation présumée dans laquelle se trouve la tache.

Plus précisément, l'invention concerne un procédé d'analyse d'un front d'onde basé sur la mesure locale de la pente du front d'onde, le procédé comprenant une étape d'acquisition du front d'onde consistant en:

- une étape de détection du front d'onde au moyen notamment d'une matrice de microlentilles, d'un détecteur et de moyens de traitement du signal; chaque microlentille définit une sous-pupille indexée, et focalise une surface élémentaire du front d'onde, interceptée par ladite sous-pupille; une tache est formée sur le détecteur qui délivre un signal; une zone de localisation présumée de la tache sur le détecteur est définie pour chaque sous-pupille.

- une étape de traitement du signal délivré par le détecteur qui permet d'établir un fichier de mesure; ce fichier associe notamment à chaque sous-pupille dans la zone de localisation de laquelle est détectée une tache, la position de cette tache, chaque sous-pupille étant repérée par son index.

Le procédé est caractérisé en ce qu'il comporte en outre:

- le choix préalable d'une matrice de microlentilles présentant au moins une variation locale de sa structure,
- une étape préalable de caractérisation de cette matrice permettant d'établir un fichier de référence associant notamment à chaque sous-pupille, repérée par son index, la position de la tache issue de ladite sous-pupille lorsque la sous-pupille est éclairée par un front d'onde connu, les données du fichier com-

portant une contribution due à la variation locale de la structure de la matrice,

- lors de chaque analyse d'un front d'onde,

- l'établissement du fichier de mesure, les données du fichier comportant également une contribution due à la variation locale de la structure de la matrice,

- la comparaison desdites contributions prises dans chacun des deux fichiers, cette comparaison permettant de déterminer un décalage éventuel en nombre de sous-pupilles entre ces deux contributions et d'en déduire de manière certaine la correspondance entre une tache détectée et la sous-pupille dont elle est issue,

- le calcul, connaissant cette correspondance, à partir du fichier de mesure et du fichier de référence, de la pente moyenne du front d'onde sur chaque surface élémentaire interceptée par chaque sous-pupille éclairée par le front d'onde.

Le procédé selon l'invention permet ainsi, sans déplacement du détecteur de déterminer la correspondance entre une tache détectée et la sous-pupille dont elle est issue sans devoir procéder à une nouvelle opération de calibration pour chaque analyse d'un front d'onde. Cela permet en particulier la mesure exacte du basculement d'un front d'onde incident et donne ainsi à l'analyseur une très grande dynamique de mesure. L'invention concerne également un dispositif d'analyse d'un front d'onde mettant en œuvre le procédé selon l'invention. D'autres avantages et caractéristiques de l'invention apparaîtront plus clairement à la lecture de la description qui suit, illustrée par les figures annexées suivantes, qui représentent:

- la figure 1 (déjà décrite) une matrice de microlentilles et un détecteur pour la mise en œuvre d'un exemple de procédé d'analyse de front d'onde selon l'art antérieur;

- les figures 2A à 2D, un exemple de mise en œuvre du procédé selon l'invention;

- la figure 3, un synoptique d'un exemple de mise en œuvre du procédé selon l'invention;

Le dispositif selon l'invention comporte notamment une matrice ML de microlentilles L_1 (voir figure 1), un détecteur DET et des moyens (non représentés) de traitement du signal délivré par le détecteur. Chaque microlentille L_1 définit une sous-pupille SP_1 , indexée, par exemple par un nombre entier variant de

1 à n , où n est le nombre de microlentilles de la matrice. Lors de l'analyse d'un front d'onde, chaque microlentille L_i éclairée par le front d'onde focalise une surface élémentaire du front d'onde, interceptée par la sous-pupille SP_i définie par cette
5 microlentille, pour former sur le détecteur une tache T_i . Les moyens de traitement permettent de traiter le signal délivré par le détecteur afin notamment d'établir un fichier de mesure associant à chaque sous-pupille dans la zone de localisation de laquelle est détectée une tache, la position de cette tache. La
10 position de chaque tache sur le détecteur est déterminée par exemple en considérant le barycentre de la répartition spatiale d'énergie lumineuse constituant la tache. Nous avons vu précédemment que la zone de localisation présumée (notée Z_i sur la figure 1), correspondant à une sous-pupille SP_i , peut être définie par la projection sur le détecteur DET de la sous-pupille
15 SP_i . Dans ce cas, elle est indépendante du front d'onde incident. La zone de localisation peut être définie différemment. Par exemple, elle peut être 'flottante'; c'est-à-dire que l'on définit la zone de localisation présumée d'une sous-pupille à partir de la position de la tache issue d'une sous-pupille adjacente.
20 Dans ce cas, chaque zone de localisation a par exemple la même dimension mais la position de la zone de localisation de chaque sous-pupille dépend de la forme du front d'onde incident. Selon un exemple de réalisation du dispositif selon l'invention, on
25 suppose que ces microlentilles sont de dimensions sensiblement égales et que le pas de la matrice, défini par la distance entre les centres optiques de deux microlentilles adjacentes, est sensiblement constant.

Dans le procédé selon l'invention, la matrice ML de microlentilles présente au moins une variation locale de sa
30 structure. La structure de la matrice concerne l'agencement des microlentilles les unes par rapport aux autres ainsi que les paramètres propres aux microlentilles: taille, transmission, etc.... Par variation locale de la structure, on entend aussi par
35 exemple une variation de positionnement, de taille ou de transmission de l'une des microlentilles ou de quelques microlentilles adjacentes. Cette variation peut par exemple être un défaut non voulu de la matrice de la microlentilles, défaut dû à la non-reproductibilité du procédé de fabrication de la

matrice. Il peut aussi s'agir d'une variation parfaitement contrôlée, que l'on introduit volontairement lors de la fabrication. Dans la suite, nous considérons l'exemple d'une
5 matrice de microlentilles à pas sensiblement constant, la variation locale consistant en un écart de positionnement de quelques microlentilles adjacentes par rapport à la position attendue de ces microlentilles.

10 Dans cet exemple, une variation de la structure se traduit, lors de l'analyse d'un front d'onde, par des écarts sur le détecteur des positions des taches issues des sous-pupilles impliquées dans cette variation. Dans l'exemple de mise en œuvre choisie, on considère une variation locale de la structure de la matrice introduite de façon contrôlée lors de la fabrication. La figure 2A représente, lorsque la matrice de microlentilles est
15 éclairée par un front d'onde plan, un exemple d'une distribution des écarts des positions des taches par rapport à leurs positions attendues si le pas de la matrice avait été parfaitement constant, en fonction de l'index (variant de 1 à n) des sous-pupilles dont sont issues les taches. L'écart de position, donné
20 sur la figure 2A en unités arbitraires (u.a.), est mesuré par exemple par une fraction de dimension d'un détecteur élémentaire. De façon générale, la variation locale de la matrice utilisée dans le dispositif selon l'invention, qui se traduit ici par une distribution donnée des écarts des positions des
25 taches, ne doit pas pouvoir être interprétée lors de l'analyse d'un front d'onde comme une composante de ce front d'onde. Autrement dit, la distribution des écarts des positions des taches résultant de l'acquisition du front d'onde à analyser doit pouvoir être distinguée de la distribution résultant de la
30 variation locale. Ceci est possible car pour pouvoir être analysé correctement, un front d'onde incident doit présenter des variations lentes de sa pente par rapport à la taille des sous-pupilles, ce qui se traduit par des fluctuations lentes de la distribution des écarts des positions des taches en fonction de
35 l'index des sous-pupilles. Ainsi, dans l'exemple de réalisation du dispositif selon l'invention décrit ici, la variation de la structure de la matrice doit être telle qu'elle se traduise dans la distribution des écarts des positions des taches par des fluctuations plus rapides ou, si l'on raisonne dans le domaine

fréquentiel en considérant la répartition spectrale des écarts, elle doit se traduire par des composantes de fréquences supérieures à celles dues au front d'onde à analyser. La forme de la distribution représentée sur la figure 2A constitue un exemple, et du moment que la variation reste locale, d'autres formes de distributions sont acceptables.

Dans l'exemple illustré figure 2A, on considère une seule variation locale de la structure. Avantageusement, la matrice peut en présenter plusieurs de sorte que même si elle n'est pas entièrement éclairée par le front d'onde incident, au moins une de ces variations locales soit éclairée. Dans ce cas, l'ensemble des variations doit être tel qu'il se traduise également, dans la répartition spectrale des écarts, par des fréquences supérieures à celle du front d'onde à analyser.

La figure 3 présente un synoptique d'un exemple de mise en œuvre du procédé selon l'invention adapté à l'exemple précédemment décrit. Selon l'invention, le procédé comporte outre le choix préalable 30 de la matrice ML présentant au moins une variation locale de sa structure, une étape 31 de caractérisation de cette matrice ML. Cette étape permet d'établir un fichier de référence (32) qui dans l'exemple choisi associe à chaque sous-pupille, repérée par son index, la position de la tache issue de ladite sous-pupille lorsque celle-ci est éclairée par un front d'onde connu. Les données du fichier de référence comportent une contribution due à la variation locale de la structure de la matrice. Ainsi, on pourra connaître, lors de l'analyse d'un front d'onde, la contribution de cette variation locale dans les positions des taches sur le détecteur. Cette étape de caractérisation de la matrice de microlentilles est faite une fois avant ou lors de la mise en place de la matrice dans l'analyseur et elle n'a pas besoin d'être refaite dans le cours normale d'utilisation de l'analyseur. Il suffit de garder en mémoire le fichier de référence; c'est lui qui sera utilisé lors de chaque analyse d'un front d'onde. Plusieurs méthodes sont possibles pour caractériser la matrice. Si le procédé de fabrication est parfaitement contrôlé, de telle sorte que l'on connaisse exactement la structure de la matrice et que l'on maîtrise les variations locales introduites dans cette structure, le fichier de référence peut être établi de façon théorique, en calculant

la position de la tache issue de chaque sous-pupille lorsque la matrice est éclairée par exemple par un front d'onde plan et sans basculement. Comme dans l'exemple de la figure 2A, la position des taches peut être exprimée en écart de position lorsque
5 par exemple le pas de la matrice de microlentilles est constant. Dans l'exemple de la figure 2A, l'écart de la position de chaque sous-pupille en fonction de l'index de ladite sous-pupille est déterminée dans le cas où la matrice est éclairée par un front d'onde plan, sans basculement. Si le procédé de fabrication
10 n'est pas parfaitement maîtrisée, il faut analyser la structure de la matrice une fois réalisée. Cela peut être fait avec tout moyen de caractérisation connu. Avantageusement, il est possible d'établir le fichier de référence en envoyant sur l'analyseur dans lequel se trouve la matrice un front d'onde connu. Cela
15 présente l'intérêt de caractériser la matrice une fois disposée dans l'analyseur. Ce front d'onde est par exemple une onde sphérique dont les caractéristiques sont bien maîtrisées. Ainsi, que la variation locale soit un défaut non contrôlé de la structure ou une variation introduite lors de la fabrication, le fichier
20 de référence permet de l'identifier. Le fichier de référence contient aussi la contribution d'éventuelles variations lentes de la structure de la matrice dont il faudra tenir compte lors de l'analyse d'un front d'onde.

Vient ensuite l'analyse 33 d'un front d'onde incident sur
25 l'analyseur. L'exemple choisi pour illustrer le procédé selon l'invention est celui d'un front d'onde présentant de la courbure et du basculement. La première étape de l'analyse est l'acquisition 34 du front d'onde. Elle consiste en une détection du front d'onde au moyen notamment de la matrice ML du dispositif selon l'invention, puis une étape de traitement du signal
30 délivré par le détecteur, effectuée par les moyens de traitement du dispositif selon l'invention, et permettant d'établir le fichier de mesure noté 35. Le fichier de mesure associe à chaque sous-pupille dans la zone de localisation présumée de laquelle
35 est détectée une tache, la position de cette tache. Le fichier de mesure contient ainsi, pour chacune de ces sous-pupilles, repérée par son index, la position de la tache correspondante. La figure 2B illustre sous forme d'une courbe 22 le contenu du fichier de mesure dans le cas de l'exemple du front d'onde choisi-

si, analysée grâce à la matrice de microlentilles caractérisée par le fichier de référence illustrée par la courbe 21 de la figure 2A. La courbure du front d'onde se traduit par une répartition linéaire de l'écart de la position des taches en fonction de l'index de la sous-pupille. Le basculement se traduit par un écart constant sur l'ensemble de la matrice de la position de chaque tache. Pour simplifier le schéma, on fait l'hypothèse que le basculement entraîne un écart constant de deux sous-pupilles. Ainsi, la courbe 22 fait apparaître la contribution due au front d'onde (courbure et basculement) à laquelle s'ajoute la contribution due à la variation locale de la structure (variations des écarts similaires à celles de la courbe 21). On comprend bien par cet exemple simple que sans la variation locale, la courbe 22 serait une droite, caractéristique de la courbure du front d'onde, mais qu'il ne serait pas possible de déterminer la valeur exacte du basculement, qui, dans cet exemple, serait considéré comme nul. Par conséquent, il y aurait une erreur de correspondance entre une tache détectée et la sous-pupille dont elle est issue; cette erreur pouvant fausser le calcul de la pente locale du front d'onde à partir de la position de chaque tache.

Dans le procédé selon l'invention, la variation locale de la structure de la matrice permet de déterminer le décalage éventuel (37) (mesuré en nombre entier de sous-pupilles) entre la sous pupille dont est issue une tache détectée et la sous-pupille qui définit la zone de localisation présumée dans laquelle se trouve cette tache, et d'en déduire de manière certaine cette correspondance au moyen d'une étape 36 de comparaison, dans chacun des deux fichiers (fichier de référence et fichier de mesure) des contributions dues à la variation locale. Ensuite, connaissant cette correspondance, à partir du fichier de référence et du fichier de mesure, on peut alors calculer (étape 38) la pente moyenne du front d'onde sur chaque surface élémentaire interceptée par chaque sous-pupille éclairée par le front d'onde. Lors de ce calcul, on soustrait par exemple les positions des taches enregistrées dans le fichier de référence à celles enregistrées dans le fichier de mesure et correspondant aux taches issues des mêmes sous-pupilles, ce qui permet de s'affranchir, dans l'analyse du front d'onde, des con-

tributions dues à la structure de la matrice. On peut ensuite, à partir des mesures de pente locales, procéder éventuellement à la reconstruction de la phase du front d'onde (étape 39) par des moyens connus ; cette étape permet par exemple de donner les
5 aberrations géométriques classiques du front d'onde incident, et en particulier la mesure du basculement du front d'onde, cette mesure pouvant être donnée de manière exacte grâce à la valeur connue du décalage.

La comparaison 36 des contributions peut se faire par différentes méthodes. Selon une première méthode par exemple, on va
10 chercher à comparer des fichiers entre eux. Il est alors préférable que ces fichiers ne contiennent que les contributions dues aux variations locales, c'est-à-dire des contributions hautes fréquences, comparées aux contributions basses fréquences que
15 sont celles dues au front d'onde que l'on analyse. On peut savoir a priori que le fichier de référence ne contient que les contributions dues aux variations locales; soit parce que le fichier de référence a été établi directement pour ne contenir que ces contributions, soit parce que les contributions dues aux
20 variations lentes, connues, ont été préalablement soustraites. On peut alors appliquer au fichier de mesure (étape 361) un filtre passe haut adapté aux variations locales de telle sorte à ne garder sensiblement que les contributions dues à ces variations et comparer le fichier de mesure après filtrage (362) directement avec le fichier de référence. Sur la figure 3, cette
25 comparaison est notée 363. Cette comparaison permet de déterminer un décalage éventuel (365). Si le fichier de référence contient des contributions basses fréquences, par exemple s'il a été établi au moyen d'un front d'onde connu, non plan, incident
30 sur l'analyseur, on peut appliquer aussi un filtrage passe haut au fichier de référence. Avantagusement, ce filtrage est le même, comme cela est illustré sur la figure 3. La comparaison 363 se fait alors entre les deux fichiers après filtrage, notés 362 et 364 sur la figure 3. Dans l'exemple illustré par les figures 2A à 2D, les fichiers avant comparaison sont illustrés sur
35 la figure 2C. La courbe 23 correspond au fichier de référence; c'est la même que la courbe 21 de la figure 2A car dans cet exemple, le fichier de référence ne comporte que la contribution due à la variation locale. Par contre, la courbe 24 est obtenue

après filtrage passe-haut de la courbe 22 de la figure 2B; dans cet exemple simple, le filtrage conduit juste à la suppression de la contribution due à la courbure. La comparaison 363 peut être faite par exemple par une opération de corrélation entre
5 les deux fichiers après filtrage. Le résultat de cette opération est illustré dans l'exemple choisi par la courbe 25 de la figure 2D. Cette courbe donne le résultat de la corrélation en fonction de valeurs de décalage (dec) possibles, le décalage étant donné en nombre de sous-pupilles. Il s'agit donc ici de calculer la
10 fonction :

$$\sum_i \frac{f(i) \times g(i - \text{dec})}{i}$$

où $f(i)$ est par exemple la valeur de l'écart de la position de la tache issue de la sous-pupille SP_i dans le fichier de référence (éventuellement après filtrage) et $g(i - \text{dec})$ est la valeur
15 de l'écart de la position de la tache issue de la sous-pupille SP_i dans le fichier de mesure après filtrage auquel on a appliqué un décalage dec. Dans cet exemple, le pic de corrélation se trouve pour un décalage égal à deux sous-pupilles.

Le filtrage passe-haut 361 appliqué au fichier de mesure
20 et/ou au fichier de référence peut être un filtrage classique sur les fichiers de points en choisissant une fréquence de coupure adaptée à la variation locale de la structure de la matrice; cette fréquence est par exemple égale à l'inverse du pas moyen de la matrice multiplié par un nombre donné N. N est
25 alors choisi suffisamment grand pour que soit gardée la contribution due à la variation locale et suffisamment faible pour que soit supprimée au maximum la contribution due au front d'onde incident. Le filtrage peut consister aussi, dans le cas d'un front d'onde de support donné, par exemple circulaire, et qui se
30 prête bien à une décomposition de la phase du front d'onde sur une base de polynômes connus, à soustraire dans les fichiers les contributions dues à un nombre donné de ces polynômes. Il peut s'agir par exemple des polynômes de Zernike dans le cas classique des fronts d'ondes à support circulaire.

35 Selon une autre méthode pour la comparaison (36) des contributions dues à la variation locale, il n'est pas nécessaire d'appliquer, à l'un et/ou à l'autre des 2 fichiers un filtrage passe-haut. on peut par exemple dans un premier temps appliquer

à l'un des deux fichiers une valeur hypothétique de décalage, par exemple au fichier de mesure 35, puis soustraire au fichier ainsi obtenu le fichier de référence 32. On cherche alors en itérant la valeur du décalage appliqué, pour quelle valeur de
5 décalage la contribution due à la variation locale (haute fréquence) dans le fichier issu de la soustraction est la plus faible.

Bien sûr, d'autres méthodes mathématiques peuvent être utilisées pour comparer dans les deux fichiers les contributions
10 dues à la variation locale de la structure et en déduire le décalage.

On décrit dans la suite un autre exemple de variations locales introduites dans la structure d'une matrice du dispositif selon l'invention pour la mise en œuvre du procédé selon
15 l'invention. Connaissant la forme générale de la répartition fréquentielle des positions des taches correspondant aux fronts d'onde incidents ou ce qui revient au même, la forme de la répartition fréquentielle des pentes des fronts d'onde, on peut chercher à optimiser les variations locales pour avoir la plus
20 grande probabilité de déterminer le décalage. Cette optimisation est faite en adaptant cette méthode, qui peut s'appliquer par exemple à des fronts d'onde à support circulaire dont on sait que la phase se décompose sur un nombre limité de polynômes de Zernike. On cherche alors des variations locales non périodiques
25 qui engendrent une contribution haute fréquence, dont on peut donner une répartition fréquentielle théorique connaissant la forme générale des contributions des fronts d'ondes qu'on analyse. Pour calculer la structure de la matrice qui correspond à ces variations locales, on peut par exemple effectuer un tirage
30 aléatoire sur l'ensemble des sous-pupilles des positions des taches correspondants à chaque sous-pupille. Dans le domaine fréquentiel, cela se traduit par une répartition constante que l'on multiplie par la répartition théorique des variations locales que l'on recherche. En prenant la transformée de Fourier
35 inverse de cette nouvelle répartition, on obtient de nouvelles valeurs des écarts des taches correspondant aux sous-pupilles. Ces valeurs sont données dans une unité arbitraire qu'il faut alors traduire dans une échelle métrique pour que cela puisse être appliqué en pratique à la fabrication de la matrice.

Dans tout ce qui a été décrit précédemment, on a considéré que la variation locale de la structure consistait en un écart de positionnement de une ou plusieurs microlentilles adjacentes.

5 On peut aussi considérer une variation de taille de une ou plusieurs microlentilles. Cela se traduit également dans le plan du détecteur par des écarts des positions des taches issues des sous-pupilles correspondantes à ces microlentilles.

Mais d'autres paramètres propres aux microlentilles peuvent être pris pour former la variation locale de la structure.

10 Ainsi, dans un autre exemple de matrice de microlentilles pour le dispositif selon l'invention, la variation locale de la structure peut être une variation de la transmission de une ou plusieurs microlentilles adjacentes. Dans ce cas, la variation locale ne se traduit pas par des écarts de positions de taches
15 mais par des variations d'intensité lumineuse de ces taches. Cependant, la mise en œuvre du procédé selon l'invention décrite selon l'exemple précédent peut s'appliquer tout aussi bien. Il faudra seulement dans les fichiers de référence et de mesure associer à chaque sous-pupille, en plus de la position des ta-
20 ches, leurs intensités, et ce sont les contributions dues à la variation locale de la structure de la matrice dans les intensités des taches qu'il faudra comparer (étape 36 sur la figure 3) pour y déterminer le décalage éventuel (37) en nombre de sous-pupilles entre ces contributions.

25 Bien sur, les différentes natures des variations locales de la structure de la matrice du dispositif selon l'invention peuvent être combinées.

REVENDEICATIONS

- 1- Procédé d'analyse d'un front d'onde basé sur la mesure locale de la pente du front d'onde, le procédé comprenant une
- 5 étape (34) d'acquisition du front d'onde consistant en:
- une étape de détection du front d'onde au moyen notamment d'une matrice (ML) de microlentilles (L_i), d'un détecteur (DET) et de moyens de traitement du signal, chaque microlentille (L_i) définissant une sous-pupille (SP_i), indexée, et focalisant une
 - 10 surface élémentaire du front d'onde, interceptée par ladite sous-pupille, pour former une tache (T_i) sur le détecteur délivrant un signal, une zone (Z_i) de localisation présumée de la tache sur le détecteur étant définie pour chaque sous-pupille,
 - une étape de traitement du signal délivré par le détecteur
 - 15 permettant notamment d'établir un fichier de mesure (35) associant notamment à chaque sous-pupille dans la zone de localisation de laquelle est détectée une tache, la position de cette tache, chaque sous-pupille étant repérée par son index, le procédé étant caractérisé en ce que il comporte en outre:
 - 20 • le choix préalable (30) d'une matrice (ML) de microlentilles présentant au moins une variation locale de sa structure,
 - une étape préalable (31) de caractérisation de cette matrice permettant d'établir un fichier de référence (32) associant notamment à chaque sous-pupille, repérée par son index, la
 - 25 position de la tache issue de ladite sous-pupille lorsque la sous-pupille est éclairée par un front d'onde connu, les données du fichier comportant une contribution due à la variation locale de la structure de la matrice,
 - lors de chaque analyse (33) d'un front d'onde,
 - 30 - l'établissement du fichier de mesure (35), les données du fichier comportant également une contribution due à la variation locale de la structure de la matrice,
 - la comparaison (36) desdites contributions prises dans chacun des deux fichiers, cette comparaison permettant de
 - 35 déterminer un décalage éventuel (37) en nombre de sous-pupilles entre ces deux contributions et d'en déduire de manière certaine la correspondance entre une tache détectée et la sous-pupille dont elle est issue,

- le calcul (38), connaissant cette correspondance, à partir du fichier de mesure et du fichier de référence, de la pente moyenne du front d'onde sur chaque surface élémentaire interceptée par chaque sous-pupille éclairée par le front d'onde.

5 2- Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que le fichier de référence (32) ne comprend qu'une contribution due à la variation locale et en ce que la contribution due à la variation locale dans le fichier de mesure est obtenue par application audit fichier d'un filtrage passe-haut (361) adapté
10 à ladite variation, le décalage (37) entre les deux contributions étant alors déterminé par comparaison (363) du fichier de référence (32) et du fichier de mesure après filtrage (362).

15 3- Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que les contributions dues à la variation locale dans le fichier de mesure et dans le fichier de référence sont obtenues par application aux deux fichiers d'un même filtrage passe-haut (361), le décalage (37) entre les deux contributions étant déterminé par comparaison (363) des deux fichiers après filtrage (362, 364).

20 4- Procédé selon l'une des revendications 2 ou 3, caractérisé en ce que la phase du front d'onde à analyser pouvant se décomposer sur une base de polynômes connus, le filtrage passe-haut (361) appliqué à un fichier consiste à soustraire à ce fichier les contributions dues à un nombre donné de ces polynômes.

25 5- Procédé selon l'une des revendications 3 ou 4, caractérisé en ce que la comparaison (363) des fichiers après filtrage est faite au moyen d'une opération de corrélation.

30 6- Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que la comparaison (36) est faite en appliquant à l'un des deux fichiers (32, 35) une valeur hypothétique de décalage, en effectuant une soustraction entre le fichier ainsi obtenu et l'autre fichier, et en itérant la valeur du décalage appliqué de telle sorte à déterminer pour quelle valeur de décalage, la contribution due à la variation locale dans le fichier issu de la soustraction est la plus faible.

35 7- Procédé selon l'une des revendications précédentes, caractérisé en ce qu'il comprend en outre une étape (39) de reconstruction de la phase du front d'onde, permettant notamment de déterminer la valeur exacte du basculement du front d'onde.

8- Dispositif d'analyse d'un front d'onde comprenant notamment une matrice (ML) de microlentilles (L_i), un détecteur (DET) et des moyens de traitement du signal, chaque microlentille (L_i) définissant une sous-pupille (SP_i), indexée, et focalisant une surface élémentaire du front d'onde, interceptée par ladite sous-pupille, pour former une tache (T_i) sur le détecteur délivrant un signal, une zone (Z_i) de localisation présumée de la tache sur le détecteur étant définie pour chaque sous-pupille, les moyens de traitement permettant de traiter le signal délivré par le détecteur afin notamment d'établir un fichier de mesure (35) associant notamment à chaque sous-pupille dans la zone de localisation de laquelle est détectée une tache, la position de cette tache, chaque sous-pupille étant repérée par son index, le dispositif étant caractérisé en ce que:

15 • sa matrice (ML) de microlentilles présente au moins une variation locale de sa structure, cette matrice étant préalablement caractérisée afin que soit établi un fichier de référence (32) associant notamment à chaque sous-pupille, repérée par son index, la position de la tache issue de ladite sous-pupille lorsque la sous-pupille est éclairée par un front d'onde connu, les données du fichier comportant une contribution due à la variation locale de la structure de la matrice,

20 • le fichier de mesure (35) comporte également une contribution due à la variation locale de la structure de la matrice,

25 • les moyens de traitement permettent en outre

- l'établissement du fichier de mesure (35), les données du fichier comportant également une contribution due à la variation locale de la structure de la matrice,

30 - de comparer lesdites contributions prises dans chacun des deux fichiers, cette comparaison permettant de déterminer un décalage éventuel (37) en nombre de sous-pupilles entre ces deux contributions et d'en déduire de manière certaine la correspondance entre une tache détectée et la sous-pupille dont elle est issue,

35 - de calculer, connaissant cette correspondance, à partir du fichier de mesure et du fichier de référence, la pente moyenne du front d'onde sur chaque surface élémentaire interceptée par chaque sous-pupille éclairée par le front d'onde.

9- Dispositif selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'au moins une variation locale de la structure de la matrice est un défaut non contrôlé de la matrice dû à la non reproductibilité du procédé de fabrication de la matrice.

5 10- Dispositif selon la revendication 8 ou 9, caractérisé en ce qu'au moins une variation locale de la structure de la matrice est une variation contrôlée, introduite lors de la fabrication de la matrice.

10 11- Dispositif selon l'une des revendications 8 à 10, caractérisé en ce que la forme générale de la répartition fréquentielle des pentes du front d'onde étant connue, des variations locales sont introduites dans la structure de la matrice de telle sorte que la répartition fréquentielle de la contribution due à ces variations locales soit adaptée à ladite
15 forme générale.

12- Dispositif selon l'une des revendications 8 à 11, caractérisé en ce qu'au moins une variation locale de la structure consiste en un écart dans la position d'une ou de quelques microlentilles adjacentes, les contributions prises dans chacun
20 des deux fichiers pour être comparées (36) étant les contributions dues à la variation locale dans les positions des taches.

13- Dispositif selon l'une des revendications 8 à 12, caractérisé en ce qu'au moins une variation locale de la structure consiste en une variation de transmission d'une ou de quelques
25 microlentilles adjacentes, les fichiers (32,35) associant en outre à chaque sous-pupille l'intensité de la tache issue de ladite sous-pupille, les contributions prises dans chacun des deux fichiers pour être comparées (36) étant les contributions dues à la variation locale dans les intensités des taches.

figure 1

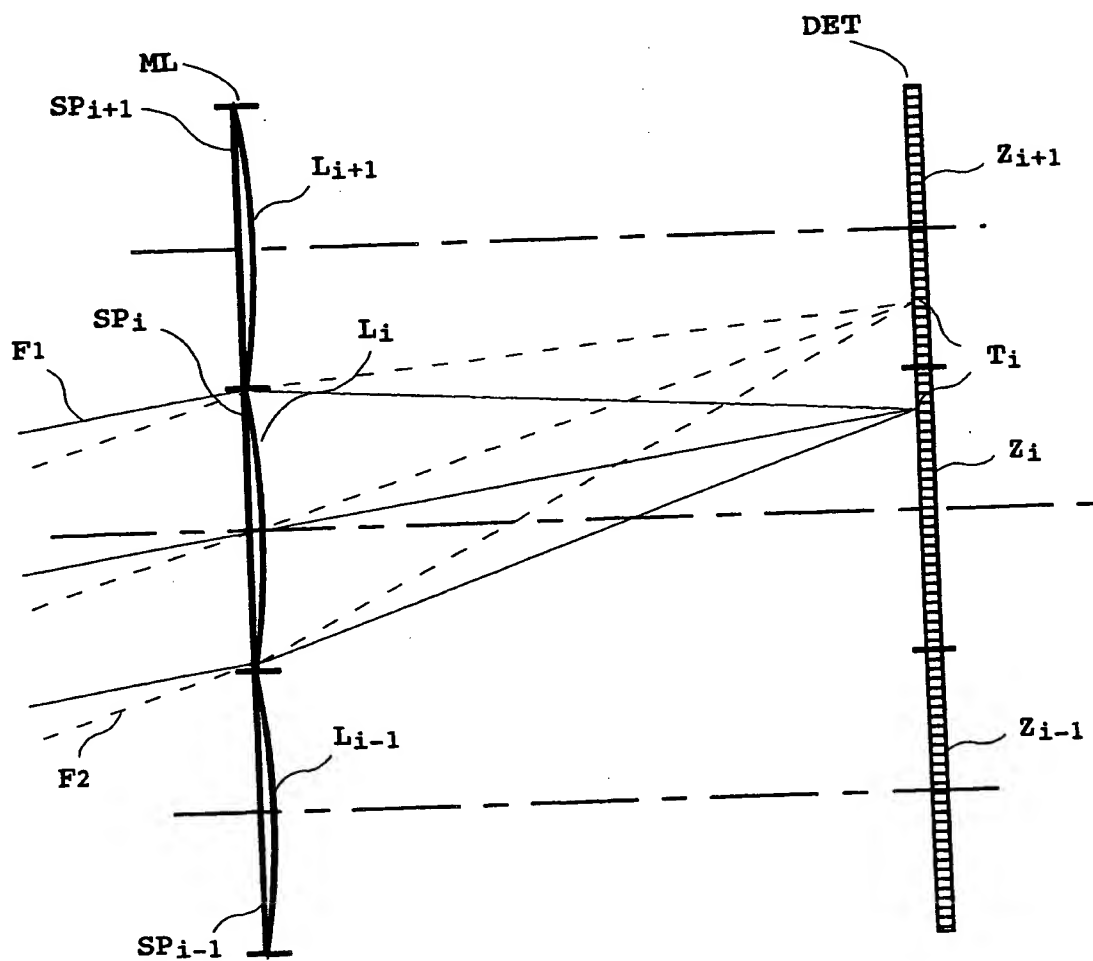


figure 2A

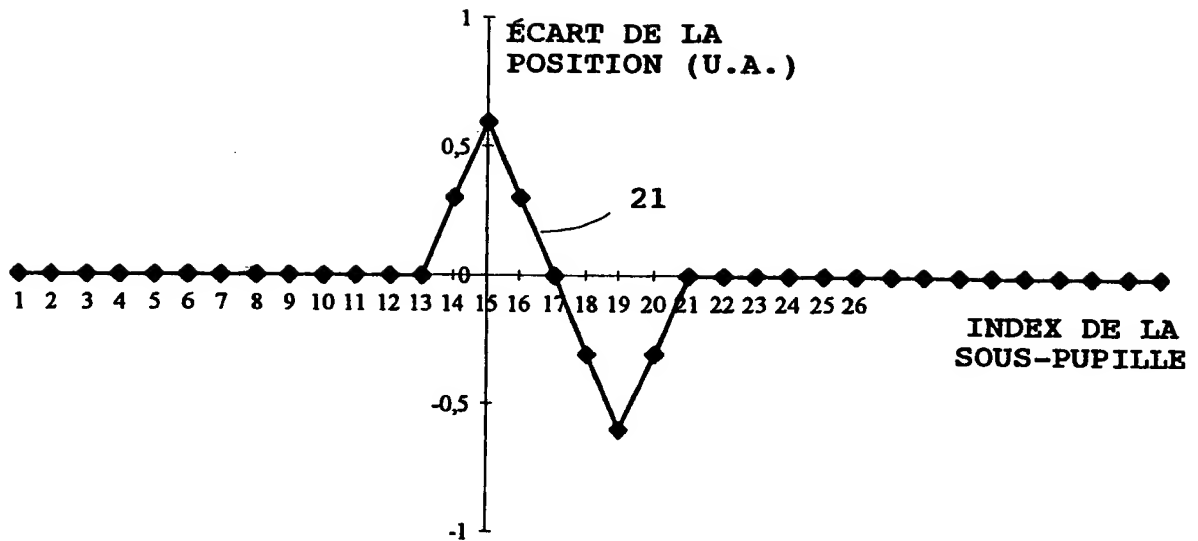


figure 2B

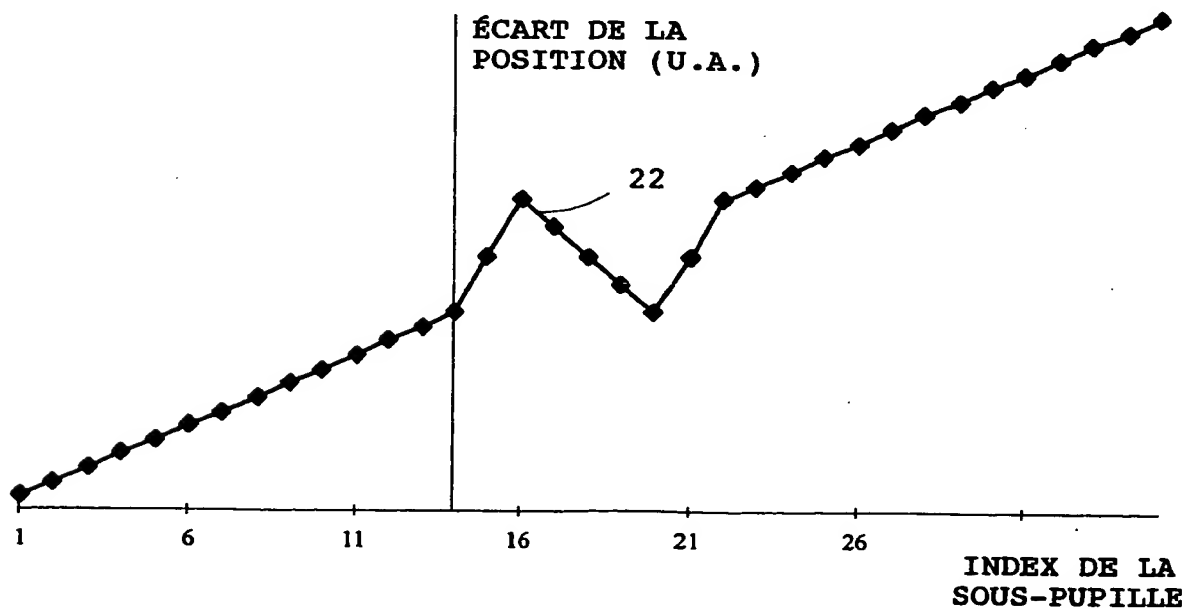


figure 2C

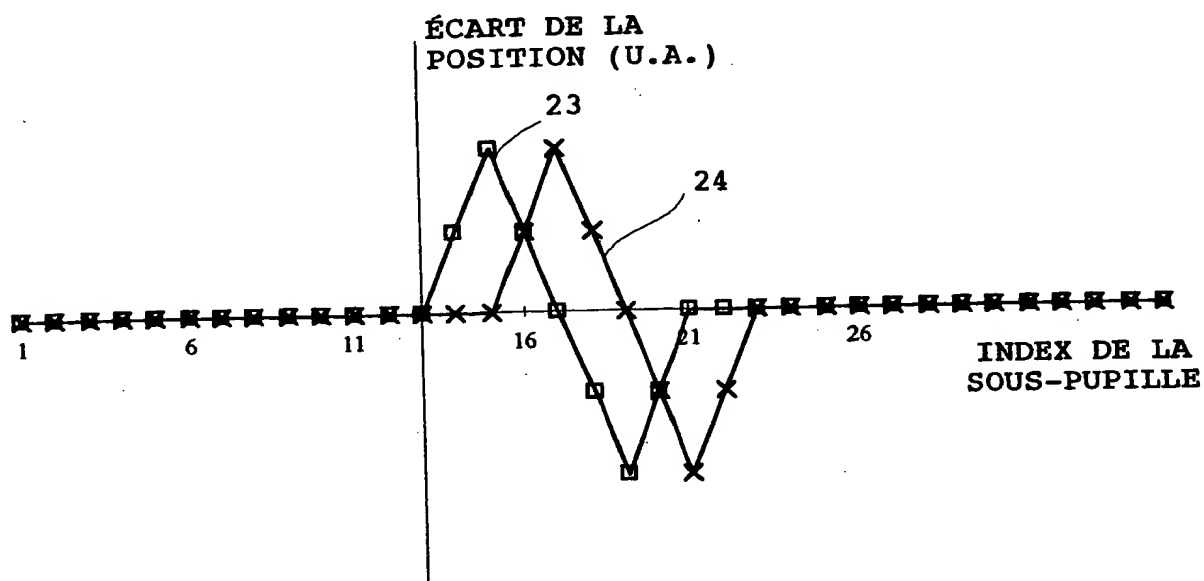


figure 2D

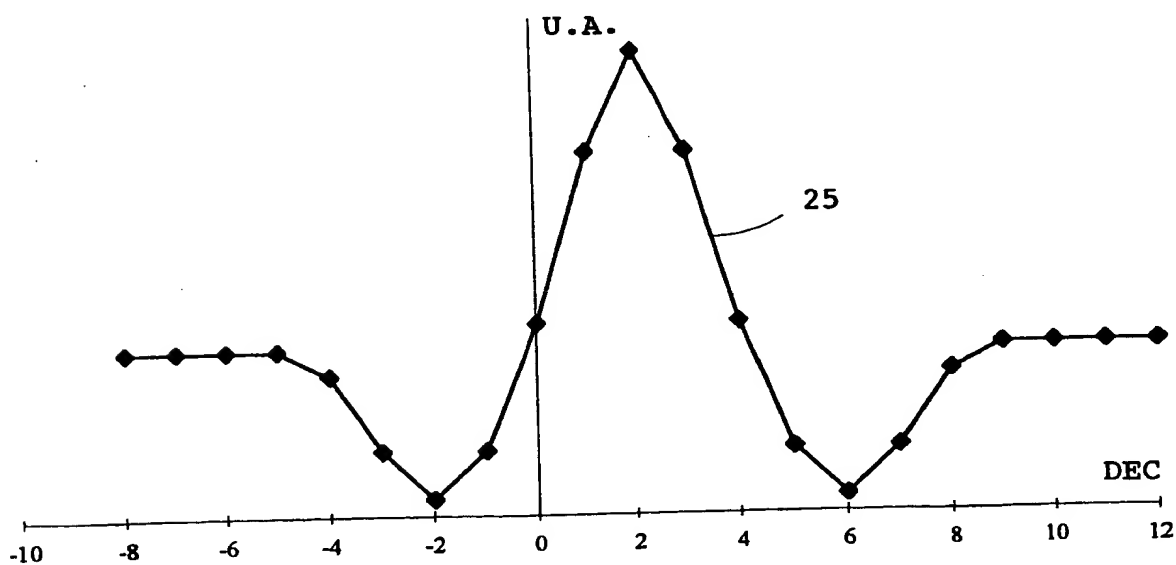


figure 3

